고해상도 Bootstrapped Differential Semblance를 이용한 자동 속도분석

최형욱 · 변중무*

한양대학교 자원환경공학과

Automatic Velocity Analysis by using an High-resolution Bootstrapped Differential Semblance Method

Hyungwook Choi and Joongmoo Byun*

Dept. of Natural Resources and Geoenvironmental Engineering, Hanyang Univ.

요약: 효율적이고 객관적인 NMO 속도분석을 위해 사용되는 자동 속도분석의 정확성은 속도 빗띠의 속도 해상도에 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 고해상도 BDS (high-resolution Bootstrapped Differential Semblance)를 이용하여 속도 빗띠를 구성하고, 이를 이용하여 공통 중간점 모음 별로 병렬적으로 자동 속도분석을 수행하는 모듈을 개발하였다. 또한 이 고해상도 BDS를 이용하는 자동 속도분석 모듈의 속도분석 결과를 BDS (Bootstrapped Differential Semblance)를 이용한 자동 속도분석의 결과와 비교하였다. 수평층을 포함한 속도모델로부터 얻은 합성 탄성과 탐사자료를 생성하고 이를 이용하여 개발된 모듈을 검증한 결과 본 연구를 통해 개발된 모듈이 좀 더 정확한 속도를 추정하는 것을 확인하였다. 또한 현장자료에 개발된 모듈을 적용하여 이벤트의 연속성이 향상된 공통 중간점 겹쌓기 단면을 구할 수 있는 NMO 속도를 추정하였다.

주요어: 자동 NMO 속도분석, 고해상도 BDS, NMO 속도분석

Abstract: The accuracy of the automatic NMO velocity analysis, which is used for an effective and objective NMO velocity analysis, is highly affected by the velocity resolution of the velocity spectrum. In this study, we have developed an automatic NMO velocity algorithm, where the velocity spectra are created using high-resolution bootstrapped differential semblance (BDS), and the velocity analysis on CMP gathers is performed in parallel with MPI. We also compared the velocity models from the developed automatic NMO velocity algorithm with high-resolution BDS to those from BDS. To verify the developed automatic velocity analysis module we created synthetic seismic data from a velocity model including horizon layers. We confirmed that the developed automatic velocity analysis module estimated velocity more accurately. In addition, NMO velocity which yielded a CMP stacked section, where the coherency of the events were improved, was estimated when the developed module was applied to a marine field data set.

Keywords: automatic NMO velocity analysis, high-resolution BDS, NMO velocity analysis

서론

탄성과 반사법 탐사자료의 자료처리에서 NMO 속도분석은 지하의 속도를 추정하는 필수적인 자료처리 단계 중 하나이다. 하지만 NMO 속도분석은 일반적으로 사람에 의해 수행되기

때문에 분석자의 노력과 많은 시간을 필요로 한다. 특히 지하 구조의 보다 정확한 영상을 얻기 위해 최근 들어 빈번히 수행되고 있는 3차원 탄성과 자료와 같이 방대한 자료를 처리해야 하는 경우 보다 효율적이고 객관적인 속도분석이 필요하며, 이를 위해 자동으로 NMO 속도분석을 수행하는 연구들이 수행되어 왔다(Choi *et al.*, 2009; Abbad *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2010; Kwon *et al.*, 2013).

공통 중간점 모음상에 나타나는 반사 이벤트의 궤적은 RMS 속도와 영 벌림 주시(zero-offset traveltimes)의 정보를 포함하고 있다. 따라서 그 궤적 상의 진폭들의 결맞음(coherence)을 측정하여 NMO 속도분석을 수행할 때 기준이 되는 속도 빗띠(velocity spectrum)를 구성할 수 있다. 일반적으로 사람이 NMO 속도분석을 수행할 경우에는 한 공통 중간점 모음마다 속도 빗띠를 기준으로 분석한 RMS 속도를 적용한 NMO

2013년 9월 6일 접수; 2013년 11월 12일 수정; 2013년 11월 14일 채택

*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Department of Natural resources and Geoenvironmental Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 133-791, Korea

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

보정 결과를 속도분석 과정에서 언제든지 확인할 수 있다. 하지만 자동으로 수행하는 NMO 속도분석의 경우에는 이와 같은 확인 과정을 거칠 수 없기 때문에 속도 빗떠의 속도 해상도는 자동 NMO 속도분석의 정확성에 더 큰 영향을 준다. 따라서 정확한 속도분석을 위해서는 높은 속도 해상도를 갖는 속도 빗떠가 필요하며 속도 빗떠를 구성하는 결맞음을 측정하는 연구들이 진행 되어 왔다.

전통적으로는 선택된 궤적의 진폭들을 모두 합한 값의 제곱을 같은 경로 상의 진폭의 제곱들 합으로 정규화하여 결맞음을 측정하는 님음(semblance)을 이용하여 속도 빗떠를 계산하는 것이 일반적이다(Taner and Koehler, 1969; Neidell and Taner, 1971). 그 이외에 연속된 트레이스의 진폭의 차를 이용한 DS (differential semblance)는 주로 최소자승법을 기반으로 한 참반사 보정 속도분석이나 토모그래피 목적함수를 구성하는데 사용된다(Symes and Carazzone, 1991; Plessix *et al.*, 2000, Brandsberg-Dahl *et al.*, 2003). 또한 교차 상관(cross-correlation)을 이용하여 결맞음을 계산하기도 한다(Neidell and Taner, 1971; Larner and Celis, 2007). Abbad *et al.* (2009, 2010)은 Sacchi (1998)가 제안한 bootstrap를 이용한 방법과 DS (differential semblance)를 기반으로 궤적 상의 진폭을 입력자료의 트레이스 순서가 아니라 무작위로 배열시킨 후 인접한 트레이스의 진폭의 차를 이용하여 결맞음을 구하는 BDS (bootstrapped differential semblance)를 제안하고 이를 이방성을 고려한 자동 속도분석 알고리즘에 적용하였다.

한편, Abbad와 Ursin (2012)은 높은 해상도를 갖는 속도 빗떠를 구하기 위해 BDS (Bootstrapped Differential Semblance, Abbad *et al.*, 2009)를 개선한 고해상도 BDS를 제안하였다. 벌림(offset)에 따라 트레이스를 정렬시킨 공통 중간점 모음 상의 NMO 보정된 이벤트를 살펴보면 먼 벌림의 이벤트가 가까운 벌림의 이벤트에 비해 NMO 보정에 사용되는 속도에 민감하다. BDS에서는 공통 중간점 모음의 전체 트레이스들을 무작위로 정렬 시키고, 이웃한 트레이스들의 NMO 보정된 이벤트의 진폭차를 더하면서 계산하는 반면에 고해상도 BDS에서는 먼 벌림과 가까운 벌림의 차를 비교하기 위해 홀수 번째에는 가까운 벌림의 트레이스들을 무작위로 정렬시키고, 짝수 번째에는 먼 벌림 트레이스들을 무작위로 정렬시켜 진폭차를 더한다. 그리고 고해상도 BDS는 이 작업을 반복적으로 수행하여 기존의 BDS보다 높은 해상도의 속도 빗떠를 구할 수 있다.

본 연구에서는 Choi *et al.* (2010)이 BDS와 Monte Carlo 역산을 이용하여 개발한 자동 속도분석 알고리즘을, 속도분석의 정확도와 효율성을 높이기 위해서 BDS 대신 고해상도 BDS를 적용하여 속도 빗떠를 구하고 병렬 처리를 할 수 있도록 MPI를 적용한 자동 속도분석 알고리즘을 개발하였다. 또한 개발된 자동 속도분석 알고리즘을 합성탄성파탐사자료와 해상 현장자료에 적용하고 그 결과를 기 개발된 BDS를 이용한 자동 속도분석의 결과와 비교하였다.

고해상도 BDS

NMO 속도분석을 위해서는 영 벌림 전파시간(zero-offset traveltime), 벌림 그리고 NMO 속도에 따라 반사파 주시 방정식(NMO 공식)을 따르는 쌍곡선 궤적 내에 위치한 공통 중간점 모음의 진폭들의 유사성을 측정하는 속도 빗떠가 필요하다. 속도 빗떠를 구성하기 위해서는 일반적으로 님음(semblance)을 많이 사용한다. 님음(semblance)은 식 (1)과 같이 쓸 수 있고, 주어진 NMO 속도, 영 벌림 전파시간, 그리고 벌림에 따라 결정된 쌍곡선 경로내의 진폭의 합을 이용하여 그 유사성(혹은 일관성)을 계산한다.

$$S = \frac{\sum_{t=t_0-\frac{\lambda}{2}}^{t_0+\frac{\lambda}{2}} \left(\sum_{i=1}^N d(t, x_i) \right)^2}{N \sum_{t=t_0-\frac{\lambda}{2}}^{t_0+\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=1}^N d(t, x_i)^2} \quad (1)$$

여기서, $d(t, x_i)$ 는 시간 t 와 i 번째 트레이스 벌림인 x_i 의 함수인 입력자료의 진폭값, N 은 트레이스 개수, λ 는 계산에 사용된 시간 구간(time window), 그리고 t_0 는 시간 구간의 가운데 시간을 나타낸다. 한편, Abbad *et al.* (2009, 2010)은 먼 벌림이 가까운 벌림 트레이스들에 비해 속도의 정확성에 민감하다는 특징을 이용하여, Bootstrapped Differential Semblance (BDS)을 제안하였다. BDS는 반사파 주시 방정식을 따르는 쌍곡선 궤적 상의(벌림 순서가 아닌) 무작위로 정렬시킨 트레이스들 사이의 진폭의 차를 통해 유사성을 비교한 다음의 식 (2)과 님음(식 (1))을 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{N \sum_{t=t_0-\frac{\lambda}{2}}^{t_0+\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=2}^N [d(t, \bar{x}_i) - d(t, \bar{x}_{i-1})]^2}{4(N-1) \sum_{t=t_0-\frac{\lambda}{2}}^{t_0+\frac{\lambda}{2}} \sum_{i=1}^N d(t, \bar{x}_i)^2} \quad (2)$$

$$BDS = (1 - D)S \quad (3)$$

여기서 $\bar{x}_i$ 는 무작위로 정렬시킨 트레이스를 나타낸다. $(1-D)$ 와 S 는 각각 0에서 1사이의 값을 갖기 때문에 BDS 역시 0에서 1사이 값을 갖게 된다. 본 연구에서 사용한 고해상도 BDS (high-resolution BDS, Abbad and Ursin, 2012)는 기존의 BDS에 비해 먼 벌림과 가까운 벌림의 트레이스들의 차이를 더 잘 보기위해서, 홀수 번째에는 가까운 벌림 트레이스들을 무작위로 정렬시키고, 짝수 번째에는 먼 벌림 트레이스들을 무작위로 정렬시켜 진폭차를 계산한다. 그리고 이 작업을 r_n 번 반복적으로 수행한다(식 (4)).

Fig. 1. A CMP gather containing 5 events reflected from 6 horizon layers.

$$HBDS = (1-D_{r_1})(1-D_{r_2})\dots(1-D_{r_n})S \quad (4)$$

위에서 언급한 속도 빛띠 생성방법들을 비교하기 위해 6개의 수평층 구조를 갖는 간단한 속도모델로부터 합성탄성파자료를 생성하였다. Fig. 1은 그 자료의 공통 중간점 모음 중의 하나를 보여주고 있다. 이 공통 중간점 모음 (Fig. 1)을 입력자료로 사용하여, 닙음(semblance), BDS, 그리고 고해상도 BDS를 이용하여 생성한 속도 빛띠들이 Fig. 2에 보여지고 있다. 고해상도 BDS의 경우에는 반복횟수에 따른 성능을 비교하기

Fig. 2. Velocity spectra by using (a) conventional semblance method, (b) BDS, (c) high-resolution BDS ($r_n=3$), and (d) high-resolution BDS ($r_n=10$).

Fig. 3. A flowchart for the developed automatic velocity analysis algorithm with MPI.

위해 반복횟수(r_n)가 3인 경우(Fig. 2(c))와 10인 경우(Fig. 2(d))를 적용하였다. 그림에서 보듯이 고해상도 BDS가 기존의 방법들에 비해 높은 속도 해상도를 갖는 속도 빛띠를 생성하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 2(c)와 (d)를 비교하면 r_n 이 증가할수록 속도 빛띠의 최고치(peak)만 남고 그 외의 에너지들은 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

자동 속도분석 알고리즘

본 연구에서는 앞의 비교분석을 바탕으로 Choi *et al.* (2010)이 제안한 BDS로 생성한 속도 빛띠를 이용하는 자동 속도분석 알고리즘을 개선하여 BDS 대신 고해상도 BDS (high-resolution BDS)를 사용하여 속도 빛띠를 생성하고 이를 이용하여 자동 속도분석을 수행하는 모듈을 개발하였다.

개발된 자동 속도분석 모듈은 개선된 BDS를 통해 얻어진 속도 빛띠를 이용하여 목적함수를 구하는 단계, grid search를 이용하여 초기 속도함수(RMS 속도(v_{rms}))와 이에 대응하는 구간속도(interval velocity)를 구하는 단계, 마지막으로 Monte Carlo 역산을 이용하여 제약조건들을 통해 지질학적으로 타당한 범위 내에서 구간속도함수를 변화시키면서 이에 대응하는 RMS 속도함수가 목적함수를 최소화하는 최적의 RMS 속도함수와 구간속도함수를 찾는 단계로 구성 된다(Fig. 3). 또한 계산의 효율을 높이기 위해 병렬처리방법을 이용하였다. Fig. 3에서 CMP_n 은 n 번째 공통 중간점 모음을 의미하고, $ncmp$ 는 분석되는 공통 중간점 모음의 개수, $ncpu$ 는 사용할 수 있는 cpu의 개수를 나타낸다.

첫 번째 단계에서는 공통 중간점 모음을 입력자료로 받아서 개선된 BDS를 이용하여 속도 빛띠를 계산한다. 이렇게 얻은 속도 빛띠의 각 시간 샘플마다 가장 큰 값들을 모두 더한 값($HBDS_{max}$)을 구하고 식 (5)와 같은 목적함수를 구성한다.

$$E = 1 - \frac{HBDS_{sum}}{HBDS_{max}} \quad (5)$$

여기서 $HBDS_{sum}$ 은 반복적으로 추정되는 RMS 속도함수가 지나가는 경로 상의 속도 빛띠 값들을 합한 것이다.

두 번째 단계에서는 식 (6)과 같은 초기 RMS 속도모델 식 (Lumley, 1997)을 가정하고, 가정한 모델에서 시간이 0초 일때의 RMS 속도(v_0) 그리고 시간에 따른 기울기(α)와 구배(β)를 찾는다.

$$v_s(t) = v_0 + \alpha t^\beta \quad (6)$$

식 (5)를 최소화 하는 최적의 v_0 , α , β 조합을 grid search를 이용하여 구한다. 그리고 구해진 초기 RMS 속도함수에 대응하는 초기 구간속도함수는 식 (6)과 Dix 공식을 이용하여 유도한 식 (7)을 사용한다(Lumley, 1997).

Fig. 4. A detailed flowchart of the Monte Carlo inversion step (taken from Choi *et al.*, 2010).

$$v_{interval}(t) = \sqrt{v_0^2 + 2v_0\alpha(1+\beta)t^\beta + (1+2\beta)\alpha^2 t^{2\beta}} \quad (7)$$

세 번째 단계에서는 식 (7)에서 구한 초기 구간속도를 식 (8)과 같이 무작위 함수를 이용하여 변화시킨다(Choi *et al.*, 2010).

$$v_{interval-guess}(t) = (1 - \sigma R)v_{interval}(t) \quad (8)$$

여기서, R 은 -1부터 1까지 범위 내에서 변화하는 무작위 함수를 나타내고, σ 는 0부터 1사이의 값을 갖고 주어진 구간속도모델($v_{interval}(t)$)의 변화 기준을 결정한다. 예를 들면, 주어진 기준 속도가 1000 m/s이고 σ 가 0.5라면 추정되는 속도는 500 m/s에서 1500 m/s의 범위 내에 있게 된다. 식 (8)에서 추정된 구간속도가 제약조건들을 적용한 범위 안에 있는지 확인하고, 이에 대응하는 RMS 속도함수를 이용하여 구한 목적함수 (식 (5))가 수렴조건을 충족하는지 확인한다(Fig. 4). 제약조건으로는 지질학적으로 타당한 구간속도를 구하기 위해서 사용한 제약조건들(전역 경계조건, 지역 경계조건), 속도 빛띠상에 나타나지 않는 경계에서 갑작스럽게 구간속도가 변화하는 것을 막기 위한 경계조건, 다중반사파가 만든 잘못된 최고치를 따라가는 것을 방지하기 위한 제약조건(RMS 속도증가조건)들이 사용되었다(Table 1). 또한 random step 루프에서 어떤 구간속도함수가 수렴조건을 만족하면 random step 루프를 빠져나와 random walk 루프의 수렴조건을 확인한다. 만약 수렴조건을 만족하면 이 구간속도함수와 이에 대응하는 RMS 속도함수를 결과값으로 정한다. 그러나 수렴조건을 만족시키지 못하면 지금 구해진 구간속도함수를 초기 구간속도함수로 갱신하고 다시 random step 루프를 수행한다(Fig. 4). Monte Carlo 역산은 무작위 함수를 이용하여 해를 찾기 때문에 해를 찾지 못하고 발산하거나 계산시간이 많이 걸리는 문제가 발생할 수 있는데

Table 1. Constraints for the automatic velocity analysis (Choi *et al.*, 2010).

Constrains	Functions
Limit the local range of the interval velocity perturbation	Keep interval velocity perturbation geologically reasonable values
Limit the global range of the interval velocity perturbation	
Make vertical change of interval velocity reasonable	Prevent vertically strong interval velocity variations
Select the stacking velocity at higher velocity than previous time	Avoid picking multiples in velocity spectra

초기속도함수를 random step을 통해 변화 시키다가 수렴조건을 만족시킨 결과를 새로운 초기속도함수로 갱신하는 작업을 통해 알고리즘의 수렴성을 증가시킬 수 있다.

수치 예제

Fig. 5(a)와 같이 아래로 갈수록 점차 속도가 증가하는 수평층을 포함한 속도모델을 구축하고 Fig. 5(b)와 같은 공통 중간점 모음을 생성하였다. 이 공통 중간점 모음의 트레이스 개수는 60개, 트레이스 간격은 50 m이고 트레이스당 1126개의 샘플을 갖으며 샘플링 간격은 4 ms이다(Table 2). 앞서 생성한 합성탄성파자료(Fig. 5(b))를 입력자료로 받아 기존의 BDS로부터 속도 빛띠를 생성하고 이를 이용하여 자동 속도분석을 수행하여 얻은 v_{rms} 함수(Fig. 6(a))와 개선된 BDS로부터 속도 빛띠를 생성하고 이를 이용하여 얻은 v_{rms} 함수(Fig. 6(b))를 Fig. 6에 도시하였다. 개선된 BDS를 사용하여 생성한 속도 빛띠(Fig. 6(b)) 상의 최고치(peak)들이 기존의 BDS를 사용하여 생성한 속도 빛띠(Fig. 6(a)) 상의 최고치들에 비해 압축되어 나타난다. 이와 같은 속도 해상도의 증가는 자동 속도분석 알고리즘의 정확도에 영향을 준다. Fig. 6의 속도 빛띠들 상의 화살표 부근(약 1.7초)을 비교해보면, BDS를 통해 얻은 속도 빛띠의 최고치는 고해상도 BDS를 통해 얻은 속도 빛띠 상의 같은 시간에 나타나는 최고치에 비해 넓게 나타난다. 이 영향으로 자동 속도분석을 통해 얻은 v_{rms} 함수가 잘못된 속도를 추정

Table 2. Acquisition parameters for a synthetic data set in Fig. 5(b).

Number of traces	60
Trace interval	50 m
Number of samples per trace	1126
Sampling interval	4 ms

Fig. 6. Velocity spectra yielded by using (a) BDS and (b) high-resolution BDS. Black solid lines indicate v_{rms} functions from automatic velocity analysis.

하게 되고, 그 결과는 NMO 보정에 영향을 준다(Fig. 7). Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 BDS와 고해상도 BDS를 이용하여 자동 속도분석을 수행하여 얻은 v_{rms} 함수들을 공통 중간점에 각각 적

Fig. 5. (a) A velocity model containing flat reflectors, and (b) a synthetic CMP gather obtained with the velocity in Fig. 5(a).

Fig. 7. NMO corrected CMP gathers with (a) a v_{rms} function estimated from a BDS velocity spectrum, and (b) a v_{rms} function estimated from a high-resolution BDS velocity spectrum. And applying time windowing (1.2 ~ 2.2 sec) to (c) Fig. 7(a) and to (d) Fig. 7(b).

용하여 얻은 NMO 보정 결과이고 이들을 각각 1.2 초부터 2.2 초까지 확대하여 Fig. 7(c)와 7(d)에 나타내었다. NMO 보정은 Seismic Unix (SU)를 사용하여 수행하였고, 같은 NMO 스트레치 뮤트 변수를 사용하였다. Fig. 7(c)의 1.7초 부근에 나타난 이벤트의 먼 벌림 트레이스들을 살펴보면 이벤트가 실제 속도보다 높은 속도가 적용되어 정확히 수평으로 보정되지 않았을 뿐만 아니라 NMO 스트레치 뮤트에 의해 사라진 것을 확인 할 수 있다. 이는 Fig. 6(a)에 나타난 것과 같이 이 시간대에 나타난 속도 빛띠의 최고치가 넓게 나타난 영향으로 실제 속도보다 높은 속도를 추정하여 생기는 현상이다. 이 합성 탄성과탐사자료를 분석하기 위해 사용된 자동 속도분석 제약 조건 및 변수는 아래와 같다(Table 3). 본 연구에 사용된 Monte Carlo 역산을 위해서 구간속도의 변화(perturbation)를 함께 일으키는 층의 두께를 시간샘플 20개로 설정하였다. 입력자료의 샘플 구간이 4 ms이므로 1초당 12.5개의 층으로 나눈 것이다. 또한 grid search를 통해 주어진 초기 구간속도모델 혹은 random walk를 통해 갱신된 초기 구간속도모델의 무작위로 변화할 수 있는 허용치를 나타내는 σ 를 0.5로 설정하였

Table 3. Constraints used for the synthetic data set.

Dividing temporal layers	20
Perturbation	0.5
Local constraint	0.5, 1.5
Global constraint	1500 m/s, 4000 m/s
Maximum vertical velocity variation	150 m/s

다. 또한 지역 구간속도 제약조건은 초기 구간속도모델을 기준으로 50%에서 150%까지 변화를 허용하였고, 전역 구간속도 제약조건에서는 최저속도(v_{min})를 주어진 속도모델(Fig. 5(a))보다 낮은 1500 m/s로, 최고속도(v_{max})를 4000 m/s로 설정하였다. 구간속도 변화가 층간에 의미 없이 심하게 일어나는 것을 방지하기 위해서 설정한 제약조건은 150 m/s로 설정하였다. 이 제약조건은 그 시간의 속도빛띠의 최대값과 곱한 값을 층간 속도 차와 비교한다. 속도 빛띠의 최고치가 가질 수 있는 최대값이 1이고 최소값이 0이기 때문에 각 시간의 속도 빛띠의 최대값에 따라 층간에 최대 150 m/s에서 최소 0 m/s의 변화를 허용한다.

현장자료

해상 탄성과탐사 현장자료에 개발한 자동 속도분석 모듈을 적용하였다. Fig. 8은 자동 속도분석에 입력 자료로 사용된 공통 중간점 모음 자료들 중 하나를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 60개의 겹쌓기 수(fold)를 갖는 500개의 공통 중간점 자료를 사용하였고 트레이스의 간격은 60 m, 트레이스당 샘플개수는 988개, 그리고 샘플링 간격은 4 ms이다(Table 4). 해상 탐사자료에 자동 속도분석을 적용하기 위해서 Table 5와 같이 설정하였다. 구간속도의 변화(perturbation)를 같이 일으키는

Fig. 8. A representative CMP gather from a marine field data set.

Table 4. Acquisition parameters for a marine field data set.

Number of CMP	500
Number of traces per CMP gather	60
Trace interval	60 m
Number of samples per trace	988
Sampling interval	4 ms

Table 5. Constraints used for the marine field data set.

Dividing temporal layers	25
Perturbation	0.7
Local constraint	0.5, 1.5
Global constraint	1450 m/s, 3000 m/s
Maximum vertical velocity variation	200 m/s

층을 1초당 10개의 층으로 나누었다. 구간속도의 변화능력인 σ 를 0.7로 설정하여 30%에서 170%까지 변화를 일으키도록 설정하여 구간속도가 변화할 수 있는 능력을 높였다. 또한 지역 구간속도 제약조건은 초기 구간속도모델을 기준으로 50%에서 150%까지 변화를 허용하였고, 전역 구간속도 제약조건은 최저속도($v_{\min}$)를 물층의 속도(1500 m/s)보다 조금 낮은 1450 m/s로 최고속도($v_{\max}$)를 3000 m/s로 설정하였다. 층간 최대 구간속도 변화 허용은 200 m/s로 설정하였다. Fig. 9는 님, BDS, 그리고 고해상도 BDS를 이용하여 속도 빛띠를 구하고 각각을 이용하여 자동 속도분석을 수행하여 얻은 겹쌓기 속도함수를 도시한 것이다. 개선된 BDS에 의해 생성된 속도 빛띠의 속도 해상도가 기존의 방법들에 비해 확연히 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 Fig. 9에서 얻은 각각의 RMS

Fig. 9. v_{rms} functions estimated by (a) an automatic velocity analysis using semblance method, (b) an automatic velocity analysis using BDS, and (c) an newly developed automatic velocity analysis using high-resolution BDS ($r_n = 10$). **Fig. 10.** NMO corrected CMP gathers by applying (a) a v_{rms} function estimated with a semblance based automatic velocity algorithm, (b) a v_{rms} function estimated with a BDS based automatic velocity algorithm, and (c) a v_{rms} function estimated with a high-resolution BDS based automatic velocity algorithm.

Fig. 11. CMP stacked sections by using the velocity function estimated (a) with a BDS based automatic velocity analysis algorithm, and (b) with a high-resolution BDS based automatic velocity analysis algorithm. Latter time events in Fig. 11(b) shows more coherence events than those in Fig. 11(a) (black arrows).

속도함수를 공통 중간점 모음에 적용하여 얻은 NMO 보정 결과이다. NMO 보정시 같은 NMO 스트레치 뮤트 변수를 사용하였다. 각 자동 속도분석 알고리즘을 통해 얻은 RMS 속도함수를 적용한 NMO 보정 결과 초기 시간대(약 1초에서 2.7초)는 모두 수평으로 잘 보정된 이벤트를 확인할 수 있었다. 하지만 Fig. 10(c)의 경우 Fig. 10(a)와 (b)에 비해 후기 시간대에 이벤트들이 보다 수평으로 잘 보정된 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 님름 등을 이용하여 속도 빔피를 생성하는 경우에 후기 시간대의 속도 해상도가 낮아지는 특징이 있다. 그러나 고해상도 BDS를 사용할 경우 후기 시간대의 속도 빔피의 해상도 또한 증가시키며 이를 이용하여 목적함수를 구성하고 자동 속도분석을 수행하여 얻은 RMS 속도가 더 정확하다고 판단된다. 이와 같은 이유로 Fig. 11에 나타난 겹쌓기 단면을 살펴보면 자동 속도분석(고해상도 BDS를 이용)을 수행하여 얻은 RMS 속도를 적용하여 얻은 겹쌓기 단면(Fig. 11(b))이 Fig. 11(a)에 비해 특히 화살표로 나타낸 후기 시간대에서 연

속성이 좋은 반사면을 잘 나타내고 있다.

결론

본 연구에서는 고해상도 BDS방법이 기존의 BDS에 비해 높은 속도 해상도를 갖는 속도 빔피를 구성하는 것을 확인하였다. 또한 고해상도 BDS방법을 적용할 때 반복횟수(r_n)를 증가시키면 더 높은 속도 빔피를 구할 수 있었다. 이 고해상도 BDS를 사용하여 속도 빔피를 구성하고 공통 중간점별로 병렬적으로 속도를 분석하는 자동 속도분석 알고리즘을 개발하였다. 개발된 고해상도 BDS를 이용한 자동 속도분석 알고리즘을 통해 구한 RMS 속도함수가 BDS를 이용하는 자동 속도분석 알고리즘을 통해 구한 RMS 속도함수에 비해 보다 정확한 것을 이 속도들을 적용하여 구한 NMO 보정된 공통 중간점 모음과 겹쌓기 단면을 비교로 확인하였다. 그리고 병렬 처리 기법을 적용하여 개발된 알고리즘의 효율성을 향상 시켰다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No 20134010200520)입니다. 또한 한국지질지원연구원 기본사업인 ‘한계 유가스전 탐사시스템 및 유망구조도출 기술개발(GP2012-029)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Abbad, B., Ursin, B. and Rappin, D., 2009, Automatic non-hyperbolic velocity analysis, *Geophysics*, **74**, U1-U12.
- Abbad, B., Ursin, B., and Rappin, D., 2010, Erratum to “Automatic nonhyperbolic velocity analysis”, *Geophysics*, **75**, Y3.
- Abbad, B., and Ursin, B., 2012, High-resolution bootstrapped differential semblance, *Geophysics*, **77**, U39-U47.
- Brandsberg-Dahl, S., Ursin, B., and de Hoop, M. V., 2003, Seismic velocity analysis in the scattering-angle/azimuth domain, *Geophysical Prospecting*, **51**, 295-314.
- Choi, H., Byun, J., Seol, S. J., Ko, S., Kwak, J. Y., and Cha, Y., 2009, Application of Automatic Velocity Analysis Using Monte Carlo Method, *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, **46**, 571-581.
- Choi, H., Byun, J., and Seol, S. J., 2010, Automatic velocity analysis using bootstrapped differential semblance and global search methods, *Exploration Geophysics*, **41**, 31-39.
- Kwon, T., Byun, J., and Seol, S. J., 2013, Automatic velocity analysis considering anisotropy, *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, **50**, 11-20.
- Larner, K., and Celis, V., 2007, Selective-correlation velocity analysis, *Geophysics*, **72**, U11-U19.
- Lumley, D. E., 1997, Monte Carlo automatic velocity picks, *Stanford Exploration Project*, **75**, 1-25.

- Neidell, N. S., and Taner, M. T., 1971, Semblance and other coherency measures for multichannel data, *Geophysics*, **36**, 482-497.
- Plessix, R. E., Mulder W. A., and ten Kroode, F., 2000, Automatic cross-well tomography by semblance and differential semblance optimization: theory and gradient computation, *Geophysical Prospecting*, **48**, 913-935.
- Sacchi, M. D., 1998, A bootstrap procedure for high-resolution velocity analysis, *Geophysics*, **63**, 1716-1725.
- Symes, W. W., and Carazzone, J. J., 1991, Velocity inversion by differential semblance optimization, *Geophysics*, **56**, 654-663.
- Taner, M. T., and Koehler, F., 1969, Velocity spectra: digital computer derivation and applications of velocity functions, *Geophysics*, **34**, 859-881.